

Jarno Mäkinen

# PID- ja kaskadisäädinten viritysmenetelmien vertailua

Jatkuvatoimisen Pilot-mittakaavan katalyyttien tutkimuslaitteiston laitteisto-ohjeen luominen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Insinööritoiminta

12.4.2014

Tekijä(t) Otsikko  Sivumäärä Aika	Jarno Mäkinen PID- ja kaskadisäädinten viritysmenetelmien vertailua Jatkuvatoimisen Pilot-mittakaavan katalyyttien tutkimuslaitteiston laitteisto-ohjeen luominen  28 sivua + 13 liitettä 12.4.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kemiantekniikan insinööri
Suuntautumisvaihtoehto	Ympäristötekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Esa Toukoniitty Senior Associate Kari Jansson
<p>Opinnäytetyössä tarkasteltiin PID- ja kaskadisäädinten eri viritysmenetelmiä. Käytännön työnä tehtiin Neste Oil Oyj:n Porvoon teknologiakeskukseen operointi/laitteisto-ohje jatkuvatoimiselle pilot-mittakaavan katalyyttien tutkimuslaitteistolle (KATRI IV).</p> <p>Työssä käsiteltiin lisäksi lyhyesti katalyyttien tutkimuslaitteiston käyttöä ja käytön mahdollisuuksia sekä kerrottiin kirjoitetun ohjeen sisällöstä. Kyseinen ohje on tarkoitus siirtää myöhemmin uuteen automaatiojärjestelmään.</p> <p>Työn ensimmäinen osa esitteli käytännön työn, joka käsitteli ohjeen sisältöä ja laitteiston käyttöä. Jälkimmäinen osa käsitteli PID- ja kaskadisäädinten viritysmenetelmien vertailua ja sopivuutta eri tilanteisiin.</p> <p>Työn perusteella saatiin kattava tietopaketti seitsemästä yleisimmästä PID- ja kaskadisäädinten viritysmenetelmästä. Käsitellyt menetelmät olivat manuaalinen säätö, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Lambda, kuollut aika, taso-keskiarvo ja PID:n viritysohjelmat. Liitteistä löytyvät toteutusohjeet viritysmenetelmille. Lisäksi työn tuloksena Neste Oil Oyj sai laitteisto-ohjeen laitteistolleen.</p>	
Avainsanat	PID-säädin, kaskadisäädin, viritysmenetelmät, katalyytti

Author(s) Title	Jarno Mäkinen Comparison of different PID and cascade controller tuning methods Creation of instrument manual for continuous catalysts pilot-scale research equipment
Number of Pages Date	28 pages + 13 appendices 12 April 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Specialisation option	Environmental Engineering
Instructor(s)	Esa Toukoniitty, Lecturer Kari Jansson, Senior Associate
<p>The aim of this thesis was to examine PID and cascade controllers with different tuning methods. Practical work was done at Neste Oil's Porvoo technology center by writing an operation/instrument manual for continuous pilot-scale catalysts research equipment (KATRI IV).</p> <p>The thesis also briefly covered the use of catalysts research equipment, as well as written instruction manual contents. This instruction manual is to be transferred later to a new automation system.</p> <p>The first part of the thesis presents the practical work, which deals with the contents of the instruction manual and the use of the research equipment. The second part deals with suitability and usage of the PID and cascade controllers tuning methods.</p> <p>On the basis of the work was a comprehensive information package of the seven most common PID and cascade controller tuning methods. The methods were manual tuning, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Lambda, dead time rule, level-averaging and PID tuning programs. The appendix contains implementation instructions for these tuning methods. In addition, the result of this work was creation of the instruction manual for Neste Oil Corporation's pilot-plant.</p>	
Keywords	PID controller, cascade controller, tuning methods, catalyst

## Alkusanat

Tämä opinnäytetyö tehtiin Neste Oil Oyj:n teknologiakeskuksen koehallilla Kilpilahdessa 7.1.2014–10.4.2014 välisenä aikana.

Opinnäytetyön aihe oli mielenkiintoinen kokonaisuus prosessi- ja automaatiotekniikkaa, säädinten teoriaa sekä niiden viritysmenetelmiin tutustumista.

Haluan kiittää Neste Oil Oyj:tä työn tarjoamisesta. Lisäksi haluan kiittää työn ohjaajia DI Kari Janssonia ja Ph.D. Esa Toukoniittyä ohjauksesta ja neuvoista työn aikana. Laitteisto-ohjeen kirjoittamisen avusta ja korjauksista kiitän operaattoria Jouni Koskimäkeä.

"Eiköhän jokainen ihminen olisi jotain ihmeellistä, tavatonta, suurta jos hän vain osaisi ja uskaltaisi vapauttaa itsensä olemaan oma itsensä, sts. osaisi ja uskaltaisi poistaa itsestään sen, mikä estää ja ehkäisee häntä: sovinnaisuuden, halun apinoida, miellyttää, halun olla sitä, mitä vallitseva maku ja muoti houkuttelee häntä olemaan"

– Yrjö Kallinen (1886-1976)

Kilpilahti 10.4.2014

Jarno Mäkinen

# Sisällys

## Määritelmät ja lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Käytännön työ	1
2.1	Laitteiston kuvaus	2
2.2	Ohjeen kirjoittaminen	2
3	Laitteiston käyttö	4
3.1	Käynnistys	4
3.2	Alasajo	5
3.3	Laitteiston käyttökohteita	5
3.3.1	Rikinpoisto (Hydrodesulfurization, HDS)	6
3.3.2	Typenpoisto (Hydrodenitrogenation, HDN)	6
3.3.3	Aromaattienpoisto (Hydrodearomatization, HDA)	6
3.3.4	Hapenpoisto (Hydrodeoxygenation, HDO)	7
3.3.5	Vetyisomerointi (Hydroisomerization)	7
3.3.6	Vahanpoisto (Hydrodewaxing)	8
3.3.7	Vetykrakkaus (Hydrocracking)	8
4	PID-säädin	9
4.1	Suhdevaste	11
4.2	Integrointivaste	11
4.3	Derivointivaste	12
4.4	PID-säädinten algoritmit	12
5	PID-säätimen optimointi	13
5.1	Manuaalinen säätö	15
5.2	Ziegler-Nichols-menetelmä	16
5.2.1	Säätimen viritys-askelvastemenetelmällä (avoin piiri)	16
5.2.2	Säätimen viritys-värähtelymenetelmällä (suljettu piiri)	17
5.3	Cohen-Coon-menetelmä	18
5.4	Lambda-menetelmä	19
5.5	Kuollut aika-menetelmä (Dead time rule)	20
5.6	Taso-keskiarvo-menetelmä (Level-averaging)	20

5.7	PID:n vitysohjelmat	21
5.7.1	Scilab	21
5.7.2	GNU Octave	21
5.7.3	DotX Control Solutions PID tuning tool	22
5.7.4	PID Control Lab	22
5.8	Yhteenveto	22
6	Kaskadisäädin	24
6.1	Käyttö	25
6.2	Kaskadisäätimen optimointi	25
7	Yhteenveto	25
	Lähteet	27
	Liitteet	
	Liite 1. Jatkuvatoinisen katalyyttien tutkimuslaitteiston virtauskaavio	
	Liite 2-3. Manuaalinen vityys	
	Liite 4. Askelvastemenetelmä	
	Liite 5. Värähtelymenetelmä	
	Liite 6. Cohen-Coon vityysmenetelmä	
	Liite 7-8. Lambda vityysmenetelmä	
	Liite 9. Kuollut aika vityysmenetelmä (dead time rule)	
	Liite 10-11. Taso-keskiarvo vityysmenetelmä (level-averaging)	
	Liite 12. Kaskadisäätimen vityys	
	Liite 13. Piirin suorituskyky ongelmat	

## 1 Johdanto

Aiemmin prosessien ohjaamiseen käytettiin analogisia ohjaimia, nykyään ohjaamiseen käytetään digitaalisia signaaleja ja tietokoneita. Erilaisten automaatiojärjestelmien määrä on kasvanut voimakkaasti ja näin ollen on syntynyt tarvetta entistä monipuolisimmille säädinten viritysmenetelmille, toisin sanoen prosessi spesifisille viritysmenetelmille. Kehitys on ollut nopeaa varsinkin säädinten ohjelmistojen puolella.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää yleisimmät käytössä olevat viritysmenetelmät PID- ja kaskadisäätimille. Lisäksi työssä laaditaan näiden viritysmenetelmien menetelmäohjeet.

Työ tehdään suomalaiselle öljynjalostus- ja markkinointiyritys Neste Oil Oyj:lle, joka on keskittynyt liikennepolttoaineisiin ja muihin korkean lisäarvon tuottaviin öljytuotteisiin.

Käytännön työnä tehdään laitteisto-ohje jatkuvatoimiselle katalyyttien tutkimuslaitteistolle. Laitteistosta ei ole olemassa laitteisto-ohjetta, joten tarvetta oli luoda ohje, jolla muut operaattorit pystyisivät käyttämään kyseistä laitteistoa.

Käytännön työ osiossa kerrotaan katalyyttien tutkimusreaktorista ja laitteiston käytön mahdollisuuksista. Samaisessa osiossa kerrotaan lyhyesti myös kyseisen laitteisto-ohjeen sisällöstä. Laitteisto-ohjetta ei selosteta kokonaisuudessaan tässä työssä, salassa pidettävien tietojen takia.

## 2 Käytännön työ

Käytännön työnä tehtiin Neste Oil Oyj:n (Porvoo) teknologiakeskuksen koehalliin laitteisto-ohje KATRI IV-laitteistolle. Laitteisto on pilot-mittakaavan jatkuvatoiminen katalyyttien tutkimusreaktori, jolla pystytään tutkimaan erilaisia katalyyttejä ja jalostusprosessin eri parametrien vaikutusta niihin ja tuotteisiin.

## 2.1 Laitteiston kuvaus

KATRI IV-pilot -laitteisto voidaan jakaa kahteen eri pääkokonaisuuteen: reaktori- ja tislauksoseen (ks. liite 1), jotka koostuvat kahdesta reaktorista ja kolmesta kolonnista. Reaktoreita voidaan ajaa sarjassa tai erikseen yhdensuuntaisesti. Tislaukset ajetaan sarjassa, ja vakuumikolonnin voidaan ajaa sekä sarjassa mukana, että erikseen erillisestä syöttösäiliöstä.

KATRI IV:een syötetään vetyä ja kahdesta eri syöttösäiliöstä erilaisia syöttöjä. Syötöt pumpataan reaktoreihin ja siitä edelleen korkeapaine-erottimiin, joissa erotetaan öljy ja kaasu. Korkeapaine-erottimien jälkeen voidaan valita, tislataanko tuote vai syötetäänkö tuote suoraan tuotesäiliöihin. Tislauksen jälkeen voidaan vielä tyhjiötislata tuotetta tai vaihtoehtoisesti syöttää tämän jälkeen tuotesäiliöihin.

KATRI IV-laitteistossa on monenlaisia säätimiä, kuten paineen-, lämpötilan-, virtauksen- ja pinnansäätimiä.

Nykyinen laitteistossa oleva automaatiojärjestelmä on Honeywellin Total Plant Alcont, mutta sen korvaa loppuvuonna uusi järjestelmä nimeltään Honeywell Experion PKS.

## 2.2 Ohjeen kirjoittaminen

Ohjeen kirjoittaminen aloitettiin tutustumalla pilot-laitteistoon KATRI IV:n operaattorin kanssa, jonka jälkeen keskusteltiin ohjeen tarpeista ja vaatimuksista.

Ohjeen tekeminen aloitettiin listaamalla kaikki KATRI IV:een kuuluvat osat käyttäen hyväksi laitteiston PI-kaavioita ja kansioita. Alustava pohja suunniteltiin Wordiin, johon kirjoittaminen aloitettiin.

Laitteisto-ohje jäsenneltiin pääkokonaisuuksiin: laitteiston kuvaus, prosessin ja laitteiden toimintakuvaus, laitteiston ylösajo, normaali käyttö, laitteiston alasajo, laitteiston lukitus ja häiriötilanteet.



Laitteiston kuvaus osiossa kuvailtiin, mihin laitteistoa voidaan käyttää ja mitä sillä voidaan tutkia.

Prosessin ja laitteiden toimintakuvauksessa kirjoitettiin, mitä tapahtuu kussakin laitteiston osassa esimerkiksi reaktorin lähiympäristössä. Toimintakuvauksiin lisättiin myös mahdollisia vaihtoehtoja ajaa laitteistoa, kuten venttiilien ohituksia ja linjauksia. Osiossa käytiin läpi myös laitteistoa ja operaattoreita suojaava järjestelmä, johon kuuluivat vety- ja hiilivetyilmaisimet. Kyseiseen osioon tehtiin myös taulukko reaktoreiden ja tislainten käyttöalueista.

Laitteiston ylösajo-osiossa kuvattiin laitteiston vaatimat esivalmistelutoimenpiteet ennen käynnistystä. Tehtäviin kuuluivat käynnistysvalmistelut, reaktoreiden pakkaaminen, tiiveystesti ja lopuksi laitteiston varsinainen käynnistysohje. Käynnistysvalmistelu osio käsitteli laitteiston huuhtelua, instrumenttien kunnon tarkistamista, varopuhallusjärjestelmän ja ilmanvaihdon toiminnan tarkistamista. Tiiveystesti osio käsitteli tiiveystestin suunnittelua ja toteutusta. Tiiveystesti toteutetaan aina koeajosuunnitelman perusteella ottaen huomioon ajosta pois jätettävät osat. Tiiveystesti tehdään heliumilla. Heliumia käytetään siksi, että se on inertti ja jalo-kaasuna esiintyy atomeina ja siten sen fyysinen koko on pienempi kuin vedyllä, joka esiintyy molekyylinä. Laitteiston käynnistyksestä ja alasajosta kerrotaan kappaleessa laitteiston käyttö.

Normaali käyttö -osio käsitteli laitteiston normaalia ajotilannetta. Kyseiseen osioon kirjoitettiin, miten laitteistoa operoidaan ajossa ja näytteenotosta ajon aikana. KATRI IV:n koeajot voivat kestävää viikosta puoleen vuoteen, joten ohjeen osiossa kerrottiin laitteiston etävalvontaan asettamisesta ja hallinnasta koeajojen aikana. Laitteistosta voidaan ottaa näytteitä ajon aikana, joko paineellisena kokotuotteesta tai valuttamalla.

Laitteiston alasajo käsitteli koko laitteiston alasajoa ja reaktoreiden purkamista ajon jälkeen. Laitteisto on myös mahdollista pysäyttää väliaikaisesti lyhyeksi tai pidemmäksi aikaa.

Laitteiston lukitus- ja häiriötilanteet osio käsitteli laitteiston äkillisiä häiriötilanteita ja niiden aiheuttamia toimintaohjeita. Vetykatkon sattuessa vaarana on katalyytin koksautuminen. Syöttövirtauksen estyessä vaarana on katalyytin kuivuminen. Reaktorin lämmityskatkon jälkeen useimmissa tapauksissa ajoa pystytään jatkamaan.

Ohjeen lopussa muuta -osiossa kuvailtiin, miten hävitetään syntynyt jäte, sekä ohjeen ylläpidon ja laitteiston vastuuhenkilön tehtäviä.

Word-ohjeen tekemisen aikana tehtiin myös varoventtiilien ja murtolevyjen sekä hälytys- ja lukitusraja-alueet KATRI IV -laitteistolle Exceliin.

Automaatiojärjestelmän päivitys on tulossa KATRI IV:een myöhemmin vuonna 2014. Tekemäni käyttöohje on suunniteltu siirrettäväksi tähän uuteen järjestelmään. Tätä varten ohje suunniteltiin mahdollisimman helposti siirrettäväksi suoraan uuteen järjestelmään.

### **3 Laitteiston käyttö**

KATRI IV-pilot-laitteisto on suunniteltu erittäin joustavaksi, KATRI IV:lla voidaan tutkia katalyyttien aktiivisuutta, katalyyttien selektiivisyyttä, katalyyttien vakautta, erilaisia syöttöjä, prosessien kehittämistä ja optimointia sekä syöttö- ja tuotefraktiointeja.

#### **3.1 Käynnistys**

Laitteiston käynnistys tehdään aina käytettävän katalyytin ja valmistajan ohjeiden mukaisesti.

Yleisohje:

1. Katalyytin kastelu.
2. Katalyytin aktivointi (pelkistys, rikitys..., ja mahdollinen passivointi). Tässä vaiheessa nostetaan lämpötilat, tehdään laitteiston paineistus jne.
3. Koeajosityötön vaihto.
4. Koeajo-olosuhteiden asetus (paine, syöttövirtaus, kaasuvirtaus, lämpötila).

### 3.2 Alasajo

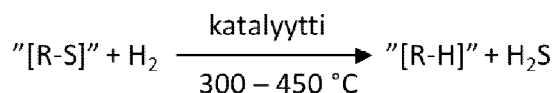
1. Aloitetaan reaktoreiden jäähdytys. Lämpötilojen laskettua noin 300 °C:seen, vaihdetaan huuhtelusyöttö. Huuhdellaan noin 1 vrk ja samalla lämmöt lasketaan 200 °C:seen.
2. Reaktorilämpötilojen laskettua noin 200 °C:een, katkaistaan öljynsyöttö ja päästetään paineet pois laitteistosta ja vaihdetaan vetysyöttö typpisyötöksi. Asetetaan lämmöt laskuun rampilla -> 100 °C. Katalyyttiä kuivataan 1 vrk.
3. Lopetetaan lämmitys ja annetaan reaktoreiden jäähtyä huoneen lämpötilaan.
4. Katkaistaan kaasusyötöt ja irrotetaan reaktorit.
5. Reaktorit avataan työpöydän kippaustelineessä, katalyytti ja hiekat puretaan ämpäriin, reaktoriputki tyhjennetään ja puhdistetaan erikoistyykaluilla.
6. Tyhjennetään tuotesäiliöt.
7. Typpisyöttö katkaistaan avattaviin säiliöihin.
8. Tyhjennetään demisterit.
9. Kytetään saatot pois.

### 3.3 Laitteiston käyttökohteita

Ensisijaisesti laitteisto on suunniteltu raskaiden hiilivetyjen ja keskitisleiden rikinpoisto- ja vetykrakkausreaktioiden tutkimista varten. Laitteistolla voidaan tehdä myös typen-, aromaattien-, hapen- ja vahanpoistoa sekä vetyisomerointia.

### 3.3.1 Rikinpoisto (Hydrodesulfurization, HDS)

Rikinpoisto (kuva 1.) on katalyyttinen kemiallinen prosessi, jossa poistetaan rikkiä joko maakaasusta tai öljytuotteista, kuten bensiinistä, lentopetrolista, kerosiinista, dieselöljystä ja polttoöljystä [11].



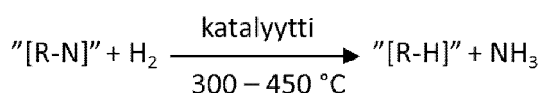
**Kuva 1. Rikin poistonreaktio**

Prosessin tarkoituksena on vähentää rikkidioksidi ( $SO_2$ ) päästöjä, jotka syntyvät poltettaessa öljyjä. Toinen syy rikin poistamiseen on katalyyttien (platina ja rений) myrkyttyminen rikistä öljynjalostamoissa. [12]

Teollisessa rikinpoisto yksikössä reaktio tapahtuu kiinteäpetireaktorissa vaihtelevissa lämpötiloissa 300 - 450 °C ja paineiden ollessa väliltä 30 - 130 bar absoluuttista painetta. Reaktiossa käytetään yleensä katalyyttiä, jossa on alumiinioksidia kantajana ja johon on liitetty koboltti-molybdeenia (CoMo) tai joskus nikkeli-molybdeenia (NiMo). [11]

### 3.3.2 Typenpoisto (Hydrodenitrogenation, HDN)

Typenpoisto (kuva 2.) on katalyyttinen kemiallinen prosessi, jossa vähennetään typen määrää [9].



**Kuva 2. Typen poistoreaktio**

Typenpoisto (HDN) on paljon vaikeampi ja vaativampi prosessi kuin (HDS), sillä se vaatii ankarampia reaktio-olosuhteita. Prosessin tarkoituksena on vähentää  $NO_x$ -päästöjä ja välttää myrkyttämistä happamia katalyyttejä. Katalyytteinä käytetään Ni-Mo-S/ $Al_2O_3$  tai Co-Mo-S/ $Al_2O_3$ . [14]

### 3.3.3 Aromaattienpoisto (Hydrodearomatization, HDA)

Aromaattienpoisto prosessissa öljyistä poistetaan nimensä mukaisesti aromaattisia yhdisteitä. Prosessiolosuhteina ovat yleensä 260 - 360 °C:een lämpötila ja

35 - 60 bar:n absoluuttinen paine. Katalyytteinä käytetään zeoliittipohjaisia katalyyttejä, joiden aktiivisina metalleina käytetään platinaa ja palladiumia. [11]

Aromaattisia yhdisteitä poistetaan öljyistä dieselöljyjen kiristyneiden päästövaatimusten takia. [11]

### 3.3.4 Hapenpoisto (Hydrodeoxygenation, HDO)

Hapenpoisto on prosessi, jossa poistetaan happea sisältäviä yhdisteitä. Hapenpoistoa käytetään varsinkin bioöljyissä, jotka pohjautuvat paljon happea sisältävistä yhdisteistä, kuten sokereista. Tyypillinen hapen poistoon käytetty katalyytti on nikkeli-molybdeeni (NiMo) tai koboltti-molybdeeni (CoMo). [10]

Korkeissa lämpötiloissa vedyn ja katalyytin läsnä ollessa tapahtuu eliminaatioreaktio, jossa happi vetenä ja typpi ammoniumina eliminoituvat sekä samalla tapahtuu hydraus-vetykrakkaus isoille molekyyleille. [6 s. 101]

Hapenpoisto prosessia ei ole tutkittu niin paljon kuin typen poistoa (HDN) ja rikin poistoa (HDS), koska happea sisältävät yhdisteet ovat yleensä pieninä pitoisuuksina öljyissä ja koska niistä ei ole niin paljon haittaa ympäristölle ja katalyyteille. [6 s.103]

### 3.3.5 Vetyisomerointi (Hydroisomerization)

Vetyisomerointi prosessissa muutetaan vahaiset *n*-alkaanit ( $C_{18+}$ ) haaroittuneiksi iso-alkaaneiksi ( $C_nH_{2n+2}$ ) [1].

Isomerointi ei itsessään kuluta vetyä, mutta vetyä tarvitaan prosessissa tapahtuviin hydrausreaktioihin. Käyttökohteina ovat esimerkiksi bensiinikomponentteina käytettävät  $C_5$ - ja  $C_6$ -jakeiden isomerointi paremman oktaaniluvun saavuttamiseksi tai  $C_4$ -jakeen eli butaanin isomerointi isobutaaniksi. [23]

Vetyisomerointia käytetään parantamaan öljyn- ja voiteluöljyjen fyysisiä ominaisuuksia kylmissä lämpötiloissa. [1]

Vetyisomeroinnissa käytetään katalyyttinä halogeenikäsiteltyä alumiinioksidia, amorfista alumiinisilikaattia tai hapanta zeoliittia [23].

### 3.3.6 Vahanpoisto (Hydrodewaxing)

Vahanpoisto prosessissa vähennetään vahan määrää öljyissä. Vahanpoisto edellyttää selektiivisen katalyytin, joka muuntaa parafiinit kevyemmiksi yhdisteiksi ja isoparafiineiksi, joiden sulamispiste on alhaisempi kuin parafiinien. Tarkoituksena on parantaa poltto- ja voiteluaineiden juoksevuutta alhaisissa lämpötiloissa. [5]

Vahanpoisto prosessin aikana tapahtuu myös kerosiinin ja dieselin syvävetykäsittely, jossa poistetaan rikki, typpi sekä samalla tapahtuu aromaattien saturaatio. [15 s.8.49]

Prosessin syöttöinä voidaan käyttää deasfaltoitua öljyä, tyhjiökaasuöljyä ja vahaisia kaasuöljyjä. [15 s.8.49]

Prosessissa käytetään katalyytteinä platinaa tai palladiumia [23].

### 3.3.7 Vetykrakkaus (Hydrocracking)

Vetykrakkaus prosessissa vedyn ja katalyytin läsnäollessa pilkotaan raskaat syöttöjakeet, kuten kerosiini, ja raskaat hiilivedyt lyhyemmiksi jakeiksi. Vedyn tarkoituksena on stabiloida syntyvät radikaalit ja sekä puhdistaa hiilivetysyöttöä rikistä ja tyypestä. [8]

Vetykrakkausprosessin aikana tapahtuu sekä krakkaus- että hydrausreaktioita. Vetykrakkaus voidaan suorittaa joko yhdessä tai useammassa vaiheessa. Syöttöille, jotka sisältävät runsaasti epäpuhtauksia, voidaan käyttää monivaiheista prosessia, jonka ensimmäisessä vaiheessa poistetaan epäpuhtauksia hydraamalla. [23]

Prosessissa syntyneitä tuotteita ovat tyydyttyneet hiilivedyt riippuen reaktioolosuhteista, kuten lämpötila, paine ja katalyytin aktiivisuus. Vetykrakkauksessa käytetään yleensä kaksitoimista katalyyttiä, joka pystyy uudelleen järjestelmään ja rikkomaan hiilivetyketjuja sekä liittämään vetyä aromaattihin ja olefiineihin muodostaen nafteeneja ja alkaaneja. [8]

Prosessissa syntyneitä päätuotteita ovat lentopetroli ja diesel, mutta myös muita fraktioita syntyy muun muassa nestekaasua, jotka kaikki sisältävät todella vähän rikkiä ja muita kontaminaatioita [8].

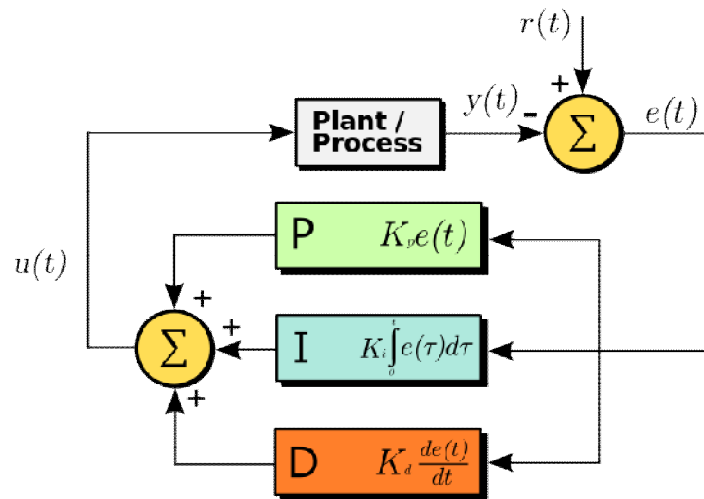
Vetykrakkaus on suuresti riippuvainen lähtöaineesta ja krakkaus- ja hydrogenointireaktioiden tasapainosta. Reaktiossa raskaasti aromaattinen lähtöaines muutetaan kevyiksi tuotteiksi todella korkeissa paineissa (70 - 155 bar) ja lämpötiloissa jotka vaihtelevat väliltä 300 - 560 °C. [8]

#### 4 PID-säädin

PID-säätimen lyhenne tulee sanoista *proportional-integral-derivative* (suhde-integroiva-derivoiva). PID-säädin (1) on yleisin säätöalgoritmi, jota teollisuudessa käytetään. [20]

Yleensä käytetään P-, PI- tai PID-säätöä, harvemmin PD:tä. Yleisin käytössä oleva säätömuoto on PI. P- ja PI-säätöä voidaan käyttää pinnan ja paineen säätämiseen. PI-säätöä taas voidaan käyttää lämpötilan (nopea säätö) ja virtauksen säätämiseen. PI- ja PID-säätöä käytetään esimerkiksi lämpötilan (hidas säätö) ja pH:n/konsentraation säätämiseen [24, 18].

PID algoritmia voidaan lähestyä monelta eri suunnalta. Se voidaan nähdä laitteena, jota voidaan käyttää muutamilla nyrkkisäännöillä tai sitä voidaan myös lähestyä analyttisesti [13 s.59].



Kuva 3. PID-säätöjärjestelmän lohkokaaaviokuva takaisinkytkennällä, jossa  $r(t)$  on prosessimuuttuja,  $y(t)$  on asetuservo,  $e(t)$  on virhe. [17]

PID-säätimen (1) erosuure ( $e(t)$ ) on prosessisuureen halutun arvon, eli asetuservon ja todellisen arvon erotus. Näin ollen säädin yrittää minimoida virheen säätämällä prosessin ohjausarvoja. [17]

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

Kaavassa  $u(t)$  on säätimen lähdöstä saatava ohjausarvo,  $K_p$  on säätimen suhteellinen vahvistus,  $T_i$  on integrointiaika ja  $T_d$  on derivointiaika. Termi  $e(t)$  on määritelty asetuservon ja mitatun prosessisuureen erotuksena. [2 s.131-132]

Esitystavasta riippuen voidaan käyttää  $K_i$ :n tilalla myös merkintää  $K_p/T_i$ , jossa  $T_i$  on integrointiaika sekunneissa, ja  $K_d$ :n sijasta merkintää  $K_p T_d$ , jossa  $T_d$  on derivointiaika sekunneissa, jolloin säädin on muotoa: [2 s.133]

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2)$$



#### 4.1 Suhdevaste

Suhteellinen termi (3) kuvaa, kuinka pitkälle mitattu suure on siirtynyt halutusta asetusarvosta [18].

Suhdevaste muodostaa säätimen ulostuloon erosuureeseen verrannollisen termin. Suhdevahvistus ( $K_p$ ) määrittää suhteen voimakkuutta ohjaussuureen ja erosuureen välillä. Suhdevahvistuksen ollessa liian suuri, alkaa prosessimuuttuja värähdellä. Kasvattaessa entisestään  $K_p$ -arvoa värähtely suurenee ja järjestelmästä tulee epävakaata ja näin ollen prosessi saattaa ajautua hallitsemattomaan tilaan. [17]

Suhdevaste ei pysty yksinään tasoittamaan säätövirhettä kokonaan. [20]

$$P = K_p e(t) \quad (3)$$

#### 4.2 Integrointivaste

Integroiva termi (4) osoittaa, kuinka kauan mitattu suure on ollut poissa halutusta asetusarvosta. Integrointivaste joko integroi tai jatkuvasti summaa syntyneen virheen, näin huolehtien siitä että säädin muuttaa ohjausta kunnes se saa erosuureen arvon nolllaksi. [18]

Pienikin erosuure aiheuttaa integrointivasteen hitaan kasvun. Integrointivaste poistaa vakaan tilan jäännösvirheen (säätövirheen). Kyseinen virhe on lopullinen erotus prosessimuuttujan asetusarvon välillä. [17]

Integroivan termin vahvistuksena käytetään integrointivahvistusta  $K_i$ . Integroivan termin käyttö auttaa esimerkiksi vakiohäiriöiden ja lineaarisesti muuttuvien asetusarvojen aiheutuvien säätövirheiden eliminoinnissa [21].

$$I = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4)$$

### 4.3 Derivointivaste

Derivointi termi (5) arvioi, kuinka nopeasti virheen arvo muuttuu ajan hetkellä. [18]

Derivointivaste ennustaa järjestelmän käyttäytymistä ja parantaa näin ollen asetumisaikaa ja järjestelmän vakautta. Toisin sanoen se pystyy tasaamaan poikkeamia jo siinä vaiheessa, kun niitä on vasta muodostumassa. [17]

Derivointi termin vahvistusta kutsutaan derivointivahvistukseksi ( $K_d$ ). Termin käyttö helpottaa stabilointia vaimennuksen ja tehokkuuden saavuttamisessa. [20]

Derivoivaa osaa käytetään kuitenkin harvoin sen herkkyyden takia, mikä vahvistaa mittauskohinan voimistumista ja näin aiheuttaen säätöpiirin epävakautta. [17]

$$D = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (5)$$

### 4.4 PID-säädinten algoritmit

PID-säädinten algoritmeja on olemassa kolmenlaisia vuorovaikutuksinen, vuorovaikutukseton ja rinnakkainen algoritmi.

Vuorovaikutuksinen algoritmi (6) on vanhin säädinten algoritmeista, jota kutsutaan myös nimellä klassinen tai todellinen. Ziegler-Nichols PID:n viritysmenetelmät suunniteltiin tälle algoritmille. [4]

$$u(t) = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \times \left[ 1 + T_d \frac{d}{dt} \right] \quad (6)$$

Vuorovaikutuksetonta algoritmia (7) kutsutaan myös nimellä ideaalinen, standardi tai ISA. Cohen-Coon ja Lambda PID:n viritysmenetelmät kehitettiin tälle algoritmille. Pelkästään PI-säätöä käytettäessä algoritmit (vuorovaikutuksinen ja vuorovaikutukseton) ovat identtisiä. [4]

$$u(t) = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (7)$$

Rinnakkainen algoritmi (8) on yleisin ja joustavin muoto. Kuitenkin se on myös muoto, jossa parametreilla on vähiten fysikaalista tulkintaa. [13]

Huomattavin ero rinnakkaisella algoritmilla on  $K_p$ :n (proportional gain) käyttö, kun taas muut algoritmit käyttävät  $K_c$ :tä (controller gain). Suhteellisen vasteen liisäminen vaikuttaa vain suhdevasteeseen. [4]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (8)$$

## 5 PID-säätimen optimointi

PID-säädinten optimoinnin tavoitteena on löytää mahdollisimman sopivat arvot säätimen vahvistukselle ( $K_c$ ), integrointiajalle ( $T_i$ ) ja derivointiajalle ( $T_d$ ) siten, että ohjattava suure seuraa asetusarvoa mahdollisimman tarkasti. [21]

Optimoinnin tavoitteena on saada säädin toimimaan riittävän hyvin esimerkiksi kuormitus- ja mittaushäiriötilanteissa ja olla sietokykyinen prosessissa tapahtuville muutoksille. [21]

Parametrien valinta säätimelle riippuu yleisesti säädettävästä prosessista ja sille asetuista suorituskysymyksistä. [2 s.136]

Yksiselitteisesti oikeita arvoja säätimelle ei ole olemassa, vaan jonkin ominaisuuden parantaminen voi usein tapahtua aina vain toisen kustannuksella. [17]

Ennen piirien virittämistä joudutaan punnitsemaan, mikä on viritettävälle prosessille tärkeintä. Tärkeintä voi olla esimerkiksi asetusarvon seuranta häiriöiden hylkimisen kustannuksella tai häiriöidensieto suorituskysymyksen kustannuksella. [4]

Toinen tärkeä asia ennen virittämistä on selvittää mitä algoritmia säädin käyttää. On olemassa kolmenlaisia PID algoritmeja: vuorovaikutuksinen, vuorovaikutukseton ja rinnakkainen. Rinnakkaista algoritmia ei suositella käytettävän sen virittämisen vaikeuden takia. Jos vain mahdollista, valitaan toinen vaihtoehto. [4]

Huomiota on kiinnitettävä myös säädinten mittayksiköihin. Useimmat säätimet käyttävät  $K_c$ :tä (esim. Honeywell Experion, Emerson DeltaV, ABB Bailey), kun taas jotkut käyttävät  $PB$ :tä (esim. Foxboro I/A, Yokogawa CS3000). ( $PB = 100 \% / K_c$ ). [4]

Moni säädin käyttää minuutteja integraalin ja derivaatan yksikköinä (esim. Siemens APACS), mutta jotkut käyttävät (esim. Emerson DeltaV) sekunteja. [4]

Jotkut säätimet käyttävät aikaa (esim. ABB Mod 300) integraaliyksikkönä, kun taas jotkut (esim. Allen-Bradley SLC500) toistoja/aika. [4]

Taulukossa 1. vertaillaan eri viritysmenetelmiä keskenään. Tasojen pinnankorkeuden kontrolloimiseen (esimerkiksi välisäiliön) on käytössä niin sanottu tasokeskiarvomenetelmä (level-averaging). Prosesseille, joilla on pitkä kuollut aika, on olemassa erillinen kuollut aika (dead time rule) viritysmenetelmä. [4]

**Taulukko 1. PID viritysmenetelmien vertailua. [17]**

Menetelmä	Edut	Haitat
Manuaalinen säätö	Ei vaadi matemaattista osaamista; online	Vaatii kokeneen henkilöstön ja prosessin tuntemista.
Ziegler-Nichols	Luotettava menetelmä; online	Prosessi häiriöitä, vaatii hieman eri parametrien kokeilua, hyvin aggressiivinen viritys
Cohen-Coon	Hyviä prosessimalleja	Vaatii hieman matemaattista osaamista, toimii vain 1. kertaluvun prosesseihin
Lambda	Taattu vakaus, kestävä, ei yliampumista	Hidas hylkimään häiriöitä, näin ollen ei sovellu pitkän aikavälin omaaviin prosesseihin
Ohjelmisto säätö	Johdonmukainen viritys, mahdollistaa simuloinnin ennen lataamista, online tai offline	Hyvät ja monipuoliset ohjelmat yleensä kalliita, vaatii ohjelman käytön opettelua

PID-säätimen viritys häiritsee aina tuotantoprosessia ja näin saattaa aiheuttaa laadun epätasaisuutta ja jopa käyntihäiriöitä. Virittämiseen liittyvät tehdaskokeet tulisi tehdä aina normaalissa jatkuvassa ajotilanteessa. Ainoastaan kriittisten säätöjen prosessikokeet tulisi ajoittaa tilanteisiin, joissa kokeiden vaikutuksella tuotannon sujuvuuteen ja laatuun ei ole merkitystä. [2 s. 141]

Integroiva prosessi ei sääda itse itseään, kun taas integroitumaton prosessi säätää itseään. Integroitumaton prosessi säätää itse itseään ja siirtyy uuteen vakaaseen tilaan tietyn ajan kuluessa. Sitä vastoin integroiva prosessi siirtyy tasaisesti yhteen suuntaan heti sen jälkeen, kun muutos tapahtuu ohjaimen lähdössä. Tämä tasainen muutos jatkuu niin kauan kunnes se korjataan. [18 s. 13]

PID-säädinten virittämiseen on olemassa useita satoja erilaisia menetelmiä. Tässä työssä käsitellään seitsemää erilaista tapaa virittää PID-säätimiä.

## 5.1 Manuaalinen säätö

Manuaalista säätöä kutsutaan myös toiselta nimeltään niin sanotuksi yrityksen ja erehdyksen menetelmäksi. Säätöpiirejä voidaan virittää myös vain kokeilemalla tai kokemuseräisesti, joka taas vaatii prosessin tuntemista.

Manuaaliset vitysmenetelmät voivat olla suhteellisen tehottomia, varsinkin jos vasteajat piireissä ovat suurin piirtein minuutin tai yli. [17]

Yleisesti ottaen parempi vitys saadaan aikaan käyttämällä matemaattisia vitysmenetelmiä. [4]

Taulukosta 2. nähdään eri parametrien ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) muutosten vaikutukset nousu-aikaan, ylitykseen, asettumisaikaan, vakaa-tila virheeseen ja vakauteen. Muutettaessa esimerkiksi  $K_p$ :n arvoa nousuaika pienenee ja vakaus huonontuu.

Ohjeet manuaalisesti tehtävään vitykseen löytyvät liitteistä (ks. liite 2).

Taulukko 2. Parametrien muuttamisen vaikutukset. [17]

Parametri	Nousuaika	Ylitys	Asettumisaika	Vakaa-tila virhe	Vakaus
$K_p$ ( $\uparrow$ )	Pienenee	Suurenee	Pieni muutos	Pienenee	Huonontuu
$K_i$ ( $\uparrow$ )	Pienenee	Suurenee	Suurenee	Eliminoituu	Huonontuu
$K_d$ ( $\uparrow$ )	Pieni muutos	Pienenee	Pienenee	Ei vaikutusta teoriassa	Parantuu jos $K_d$ on pieni

## 5.2 Ziegler-Nichols-menetelmä

Ziegler ja Nichols esittelivät PID-säädinten määrittäminen menetelmät jo vuonna 1942. Nämä menetelmät ovat vielä laajalti käytössä, joko alkuperäisessä muodossa tai hieman muunneltuina. [13 s. 134]

Menetelmää voidaan käyttää sekä suljetun piirin että avoimen piirin optimointiin. Suljettu piiri tarkoittaa, että piirissä on takaisinkytkentä, kun taas avoimessa piirissä sitä ei ole. [17]

Säätimen virittäminen voidaan toteuttaa askelvastemenetelmällä (avoin piiri) tai vaihtoehtoisesti jatkuvan värähtelyn menetelmällä (suljettu piiri).

### 5.2.1 Säätimen viritys-askelvastemenetelmällä (avoin piiri)

Askelvastemenetelmässä prosessin dynamiikkaa arvioidaan viiveellisellä 1. kertaluvun mallin avulla. Ennen virittämistä pitää selvittää, onko kyseessä 1. kertaluvun prosessi, 2. kertaluvun prosessi vai onko prosessi integroiva. [2 s. 141]

Menetelmä on vain suuntaa antava ja näin ollen ei välttämättä toimi hyvin kaikilla viiveen ja aikavakion suhteilla. [2 s. 141]

Menetelmä soveltuu avoimen piirin virittämiseen ja säätimiin, joissa on vuorovaikutuksinen algoritmi. Käytettäessä pelkästään PI-säätöä, voidaan menetelmää käyttää myös vuorovaikutuksettomille säätimille. [4]

Taulukosta 3 nähdään askelvastemenetelmän laskukaavat.

Ohjeet askelvastemenetelmällä tehtävään viritukseen löytyvät liitteistä (ks. liite 4).

**Taulukko 3. Askelvastemenetelmän parametrit (esimerkki arvoin, ks. liite 4). [2]**

Säädin	Säätimen vahvistus	Integrointiaika $T_I$	Derivointiaika $T_D$
<b>P</b>	$K_P = T_b K_1 / T_e K_2$	-	-
<b>PI</b>	$K_P = 0,9 T_b K_1 / T_e K_2$	$T_I = 3T_e$	-
<b>PID</b>	$K_P = 1,2 T_b K_1 / T_e K_2$	$T_I = 2T_e$	$T_D = 0,5T_e$

### 5.2.2 Säätimen viritys-värähtelymenetelmällä (suljettu piiri)

Useille prosesseille ei ole välttämättä mahdollista suorittaa askelkoetta joko prosessin luonteen (integraiva) tai prosessin kriittisyyden vuoksi. Tällöin säätöparametrit voidaan yrittää määrittää värähtelykokeen perusteella. [24 s. 17]

Värähtelymenetelmä ei sovellu, jos säätimen algoritmi on toteutettu nopeusalgoritmin periaatteella ja jotkut prosessit saattavat olla ongelmallisia joutuessaan värähtelytilaan. [24 s. 17]

Menetelmä soveltuu suljetun piirin virittämiseen ja säätimiin, joissa on vuorovaikutuksinen tai vuorovaikutukseton algoritmi. [4]

Taulukosta 4 nähdään värähtelymenetelmällä tehtävän virituksen laskukaavat.

Ohjeet värähtelymenetelmällä tehtävään viritukseen löytyvät liitteistä (ks. liite 5).

**Taulukko 4. Värähtelymenetelmän parametrit. [2]**

Säädin	Säätimen vahvistus	Integrointiaika $T_I$	Derivointiaika $T_D$
<b>P</b>	$K_p = 0,5K_{pkriit}$	-	-
<b>PI</b>	$K_p = 0,45K_{pkriit}$	$T_I = T_{kriit} / 1,2$	-
<b>PID</b>	$K_p = 0,6K_{pkriit}$	$T_I = T_{kriit} / 2$	$T_D = T_{kriit} / 8$

Taulukosta 5 nähdään värähtelymenetelmän muokatut laskukaavat käytettäessä PID-säädintä.

**Taulukko 5. Muokattu Ziegler-Nichols värähtelymenetelmän parametrit. [4]**

Säädin	Säätimen vahvistus	Integrointiaika $T_I$	Derivointiaika $T_D$
<b>PID original</b>	$K_p = 0,6K_{pkriit}$	$T_I = 0,5T_{kriit}$	$T_D = 0,125T_{kriit}$
<b>PID hieman yliampumista</b>	$K_p = 0,33K_{pkriit}$	$T_I = 0,5T_{kriit}$	$T_D = 0,33T_{kriit}$
<b>PID ei yliampumista</b>	$K_p = 0,2K_{pkriit}$	$T_I = 0,3T_{kriit}$	$T_D = 0,5T_{kriit}$

### 5.3 Cohen-Coon-menetelmä

Cohen ja Coon julkaisivat vuonna 1953 vitysmenetelmänsä. Menetelmä soveltuu useammille prosesseille kuin Ziegler-Nichols-menetelmä. [4]

**Taulukko 6. Cohen-Coon vitysmenetelmän laskentataulukko. [3]**

Säädin	Säätimen vahvistus	Integrointiaika $T_I$	Derivointiaika $T_D$
<b>P</b>	$\frac{1}{K \times r} \times \left(1 + \frac{r}{3}\right)$	-	-
<b>PI</b>	$\frac{1}{K \times r} \times \left(0,9 + \frac{r}{12}\right)$	$t_d \times \left(\frac{30 + 3 \times r}{9 + 20 \times r}\right)$	-
<b>PID</b>	$\frac{1}{K \times r} \times \left(\frac{4}{3} + \frac{r}{4}\right)$	$t_d \times \left(\frac{32 + 6 \times r}{13 + 8 \times r}\right)$	$t_d \times \left(\frac{4}{11 + 2 \times r}\right)$

Cohen-Coon toimii hyvin prosesseissa, joissa kuollut aika on alle kaksi kertaa niin pitkä kuin aikavakio [4].



Cohen-Coon virityssäännöt on suunniteltu vuorovaikutuksettomille säätimille, mutta säännöt toimivat myös vuorovaikutuksilla säätimillä, jos käytetään P-, PI- tai PD-säätöä. [4]

Menetelmä sopii itsesäätyviin prosesseihin, jos tavoitteena on nopea vasteaika. Laskettu säätimen vahvistusarvo on suositeltavaa jakaa kahdella. Tällä tavoin esitetään piirin ylimääräinen värähtely ja saadaan aikaiseksi hyväksyttävä vakaus. [4]

Cohen-Coon-menetelmä soveltuu ainoastaan 1. kertaluvun prosesseihin. [17]

Ohjeet Cohen-Coon-menetelmällä tehtävään viritykseen löytyvät liitteistä (ks. liite 6).

#### **5.4 Lambda-menetelmä**

Lambda viritysmenetelmällä saadaan aikaiseksi vakaa ja kestävä piiri, joka ei aiheuta asetusravon ylittymistä. Lambda-menetelmä tunnetaan myös nimellä Internal Model Control (IMC). [24, 4] Menetelmä kehitettiin 1980-luvulla. [24]

Lambda-menetelmä on kehitetty tuottamaan tasaista ohjearvon vastetta tai vastaamaan kuormituksen aiheuttamiin muutoksiin, kun taas Ziegler-Nichols (avoimen piirin) ja Cohen-Coon menetelmillä saadaan suuri säätimen vahvistus ja lyhyt vasteaika. [4]

Menetelmää käytetään paljon sellu- ja paperiteollisuudessa, jolla pystytään pitämään erittäin vuorovaikutuksiset prosessit hallinnassa. [4]

Ohjeet lambda-menetelmällä tehtävään viritykseen löytyvät liitteistä (ks. liite 7).

### 5.5 Kuollut aika-menetelmä (Dead time rule)

Monet viritysmenetelmät toimivat huonosti kun kuollut aika on pitkä ( $t_d > 2\tau$ ). Tätä varten prosesseille, joilla on pitkä kuollut aika, on olemassa oma viritysmenetelmänsä (dead time rule). [4]

Menetelmä toimii vuorovaikutuksellisia tai vuorovaikutuksettomia algoritmeja käyttävissä säätimissä, mutta ei rinnakkaisissa. [4]

Ohjeet kuollut aika menetelmällä tehtävään viritykseen löytyvät liitteistä (ks. liite 9.).

### 5.6 Taso-keskiarvo-menetelmä (Level-averaging)

Tasopiirit ovat hyvin yleisiä teollisuudessa, noin 20 % kaikista teollisuuden (jalostus-, petrokemia-, sähkö-, paperi- ja sellu-, teräs jne.) ohjauspiireistä on tasopiirejä [4]

Säiliöissä oleva neste on integroiva prosessi, jonka takia vaaditaan erilaiset viritysmenetelmät kyseisille prosesseille. [4]

Välisäiliöiden nestepinnan ohjaamiseen halutaan yleensä hidas vaste kun taas nopea vaste voidaan tarvita esimerkiksi kaasunpinnankorkeuden ohjaamiseen korkeapaine-erottimissa. [4]

Välisäiliön virittäminen voidaan tehdä käyttämällä pelkästään säätimen vahvistusta ( $K_c$ ): Esimerkiksi haluttaessa välisäiliön pinnan pysyvän 20 %:n ja 80 %:n välillä, voidaan käyttää pelkästään säätimen vahvistusta ( $K_c$ ). Säätimen vahvistuksen syötetään  $(100/(80-20) = 1,67)$  ja integrointitermi otetaan pois käytöstä. Pinta tuodaan manuaalisesti asetusarvoonsa (50 %), muutetaan väliaikaisesti säätimen ulostuloa 50 %:iin ja lopuksi asetetaan säädin automaatile. Näin toimien välisäiliön pinta saadaan pysymään halutuissa rajoissa. [4]

Ohjeet taso-keskiarvo-menetelmällä tehtävään vuritykseen löytyvät liitteistä (ks. liite 10-11.). Säiliöiden menetelmäohjeella saadaan nopea vaste ja hidas vaste saadaan välisäiliöiden menetelmäohjeella.

## 5.7 PID:n vuritysohjelmat

Nykyään monet teollisuuslaitokset eivät enää viritä piirejään käyttäen manuaalisia laskentamenetelmiä. Sen sijaan käytössä on PID:n viritys ja piirin optimointi ohjelmistoja. Nämä ohjelmistot keräävät tietoja, kehittävät prosessi malleja, ja ehdottavat optimaalisia vitysparametreja. Kaiken lisäksi jotkut ohjelmistot pystyvät jopa kehittämään vitysparametreja keräämällä tietoja ohjearvon muutoksista. [17]

Kehittyneemmissä säätöjärjestelmissä käytetään niin sanottua autotuneria. Näillä toiminnoilla saavutetaan prosessin eri toimintapisteissä vakioparametreja optimaalisempi toimintatapa. [24]

Maksullisia ohjelmistoja PID:n virittämiseen löytyy mielin määrin, mutta muutamia hyviä ilmaisjakelu ohjelmiakin on.

### 5.7.1 Scilab

Scilab on ilmainen, avoimeen lähdekoodiin pohjautuva ohjelmisto numeeriseen laskentaan. Ohjelmalla on mahdollista tehdä PID:n mallintamista ja vitystä joko avoimiin piireihin tai suljettuihin piireihin. [22]

### 5.7.2 GNU Octave

GNU Octave on ilmainen ohjelmisto, joka on avoimeen lähdekoodin pohjautuva. Ohjelmisto on tarkoitettu ensisijaisesti numeeriseen laskentaan. Ohjelmiston komentoriviliittymän avulla voidaan ratkaista lineaarisia ja epälineaarisia ongelmia numeerisesti. Ohjelman ohjelmointikieli on enimmäkseen yhteensopiva MATLAB:n kanssa. [7]

### 5.7.3 DotX Control Solutions PID tuning tool

Dotx Control Solutions PID tuning tool on ilmainen ohjelma PID:n viritykseen, joka käyttää avoimen piirin menetelmää. [19]

### 5.7.4 PID Control Lab

PID Control Lab on internetissä (Javalla) toimiva ilmainen virtuaalinen PID:n viritysohjelmisto. Ohjelmistoa voidaan käyttää PID-ohjauksen opetteluun, automaattiseen viritykseen, ennakoivaan ohjaukseen, kehittyneiden PID-säätö rakenteiden ja järjestelmien opetteluun. [16]

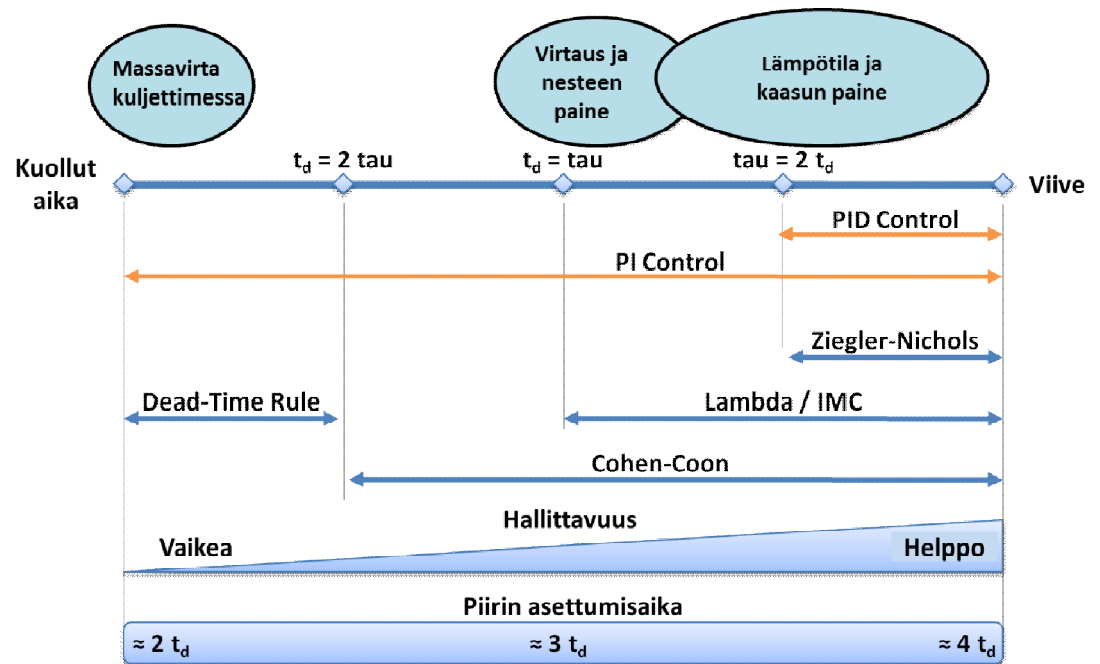
## 5.8 Yhteenveto

Tässä osiossa käsitellään eri viritysmenetelmien yhteenvetoa ja niiden suositeltuja käyttökohteita.

Yleisesti ottaen parempi viritys saadaan aikaan käyttämällä matemaattisia menetelmiä kuin pelkästään manuaalisesti virittämällä. [4]

Useimmat viritysmenetelmät soveltuvat ensimmäisen kertaluvun (itsesäätyviin) ja integroituihin prosesseihin. Nämä prosessityypit kattavat melkein valtaosan tuotantolaitosten ohjauspiireistä. [4]

Kuvassa 4. on kuvattu viritysmenetelmien käyttöalueet jatkumona kuolleesta ajasta viiveeseen.



Kuva 4. Viritysmenetelmien käyttöalueet. ( $t_d$  on kuollut aika,  $\tau/\tau_d$  on aikavakio) [4]

Useimmat PID:n viritysmenetelmät soveltuvat vuorovaikutuksettomalle algoritmil-  
le. [4]

Itsesäätäviin prosesseihin (taulukko 7.) suositellaan käytettävän Cohen-Coon PI-  
viritysmenetelmää. [4]

Prosessin kuolleen ajan ollessa pitkä ( $t_d > 2\tau$ ) käytetään erityistä kuollut aika viri-  
tysmenetelmää (dead time rule). [4]

Lambda-viritysmenetelmää käytetään tapauksissa, joissa kuollutta aikaa ei pysty-  
tä mittaamaan, halutaan tietty vasteaika ja häiriöiden absorboitumista. [4]

Derivaatiotermin käyttöä suositellaan vältettävän, mutta sitä voidaan käyttää sil-  
loin kun prosessi soveltuu siihen, toisin sanoen kun sen käyttö ei aiheuta mitta-  
uskohinan voimistumista. [4]

Integroiville prosesseille (taulukko 7.) käytetään Ziegler-Nichols viritysmenetel-  
mää, paitsi tason esimerkiksi välisäiliön säätämiseen käytetään erityistä taso-  
keskiarvon (level-averaging) menetelmää. [4]



## 6.1 Käyttö

Kaskadisäädintä on hyödyllistä käyttää, jos säädettävällä prosessilla on suhteellisen hidas dynamiikka (taso, lämpötila, koostumus, kosteus) ja nesteen tai kaasun virtaus tai jokin muu suhteellisen nopea prosessi, jota täytyy manipuloida kontrolloidakseen hidasta prosessia. [4]

Kaskadisäätimen on tarkoitus tehdä järjestelmästä herkempi, ei sietokykyisempää prosessihäiriöille. [17]

## 6.2 Kaskadisäätimen optimointi

Sarjasäädössä molemmat säätöpiirit täytyy virittää erikseen. Sarjasäädön virityksessä viritetään ensin aläsäädin ja sitten pääsäädin, joka viritetään noin 3...5 kertaa hitaammaksi kuin aläsäädin. [2 s.136]

Sarjasäätimen virittämiseen voidaan käyttää värähtely- ja lambda menetelmää mutta ei mielellään Cohen-Coonia ja muokkaamatonta Ziegler-Nichols:n menetelmää. Nämä menetelmät voivat aiheuttavaa epävakautta, jos prosessin dynamiikka on samankaltaista molemmissa piireissä [4].

Ohjeet kaskadisäätimelle tehtävään viritykseen löytyvät liitteistä (ks. liite 11).

## 7 Yhteenveto

Työtä aloitettaessa alustavasti tiedettiin, että olemassa on monia erilaisia viritysmenetelmiä, näistä menetelmistä käsittelyyn valittiin yleisimmät. Työn avulla saatiin katsaus seitsemästä viritysmenetelmästä ja niiden soveltuvuudesta erinäisiin prosesseihin.

Tärkeintä viritysmenetelmien valinnassa on ensin selvittää prosessin luonne (integraiva vai itsesäätyvä) ja tämän jälkeen miettiä, tarvitaanko nopea vai hidas/kestävä vaste kyseiseen prosessiin.

Työn perusteella selvisi, että tässä työssä läpikäydyillä menetelmillä pystytään viritämään useimmat vastaan tulevat piirit onnistuneesti. Yhteenvetona voidaan sanoa, että pelkästään PI-säätö riittänee useimpiin prosesseihin.

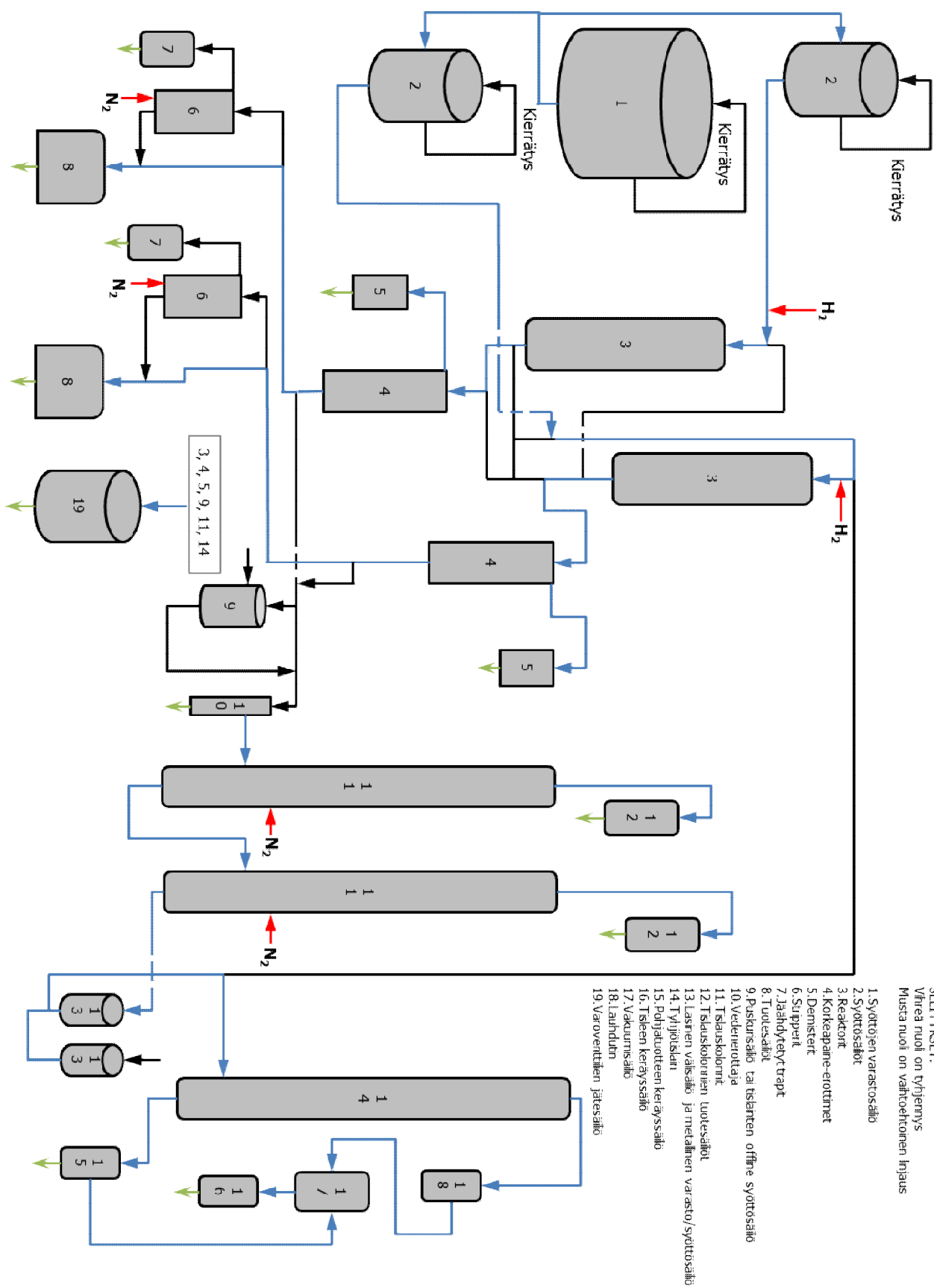
Insinööriyönä laadittua laitteisto-ohjetta käytetään pilot-laitteiston operoinnissa ja koulutusmateriaalina uusille operaattoreille. Työn kirjallista osaa voidaan käyttää koehallin laitteistojen säädinten virittämiseen.



## Lähteet

- 1 Alkane Hydroisomerization Reaction Using Molecular Sieve Catalysts. 2008. Verkkodokumentti. Patrick Ryan.  
<[http://www.chbe.northwestern.edu/docs/Hydroisomerization-Class-Presentation\\_v2.pdf](http://www.chbe.northwestern.edu/docs/Hydroisomerization-Class-Presentation_v2.pdf)>. Päivitetty 6.2013. Luettu 20.1.2014.
- 2 Asko K.Kippo, Aimo Tikka. 2008. Automaatio tekniikan perusteet. Helsinki. EDI-TA.
- 3 Cohen Coon Tuning Method. 2000. Verkkodokumentti. Tomas B. Co.  
<<http://www.chem.mtu.edu/~tbco/cm416/cctune.html>>. Päivitetty 18.1.2000. Luettu 20.1.2014.
- 4 Control Notes, Reflections of a Process Control Practitioner. 2014. Verkkodokumentti. <<http://blog.opticontrols.com/site-map>>. Luettu 28.1.2014. (Hyödyllinen sivu, säädinten viritysohjeita ja monipuolinen mutta maksullinen Opticontrols Loop Simulator)
- 5 Dewaxing technologies for distillate applications. 2013. Verkkodokumentti. Shell.  
<<http://www.shell.com/global/products-services/solutions-for-businesses/globalsolutions/refinery-chemical-licensing/refining-technology/dewaxing-technologies.html>>. Luettu 27.1.2014.
- 6 G.F.Froment, B.Delmon, P.Grangé. 1997. Hydrotreatment and hydrocracking of oil fractions: Studies in surface science and catalysis. Elsevier.
- 7 GNU Octave. 2013. Ohjelmisto. John W. Eaton.  
<<https://www.gnu.org/software/octave/about.html>>. Päivitetty 18.8.2013. Luettu 25.1.2014.
- 8 Hydrocracking. 2014. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Cracking\\_%28chemistry%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Cracking_%28chemistry%29)>. Päivitetty 20.1.2014. Luettu 27.1.2014.
- 9 Hydrodenitrogenation. 2013. Verkkodokumentti. Wiktionary.  
<<http://en.wiktionary.org/wiki/hydrodenitrogenation>>. Päivitetty 20.6.2013. Luettu 20.1.2014.
- 10 Hydrodeoxygenation. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrodeoxygenation>>. Päivitetty 8.4.2013. Luettu 20.1.2014.
- 11 Hydrodesulfurization. 2014. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrodesulfurization>>. Päivitetty 9.2.2014. Luettu 20.1.2014.
- 12 Investigation of hydrodearomatization of prehydrogenated gas oil fractions on Pt-Pd/H-USY catalysts. 2007. Verkkodokumentti. Springer.  
<<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11244-007-0265-0#page-1>>. Päivitetty 1.8.2007. Luettu 20.1.2014.

- 13 K.Åström and T.Hägglund. 1995. PID controllers: Theory, Design, and Tuning 2<sup>nd</sup> edition. ISA.
- 14 Mechanism of Hydrodenitrogenation over Carbide and Sulfide Catalysts. 1990. Verkkodokumentti. Chapter 4. <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-03062000-21090032/unrestricted/chapter4.pdf>>. Luettu 20.1.2014.
- 15 Meyers. Robert A. 1996. Handbook of petroleum refining processes (second edition). McGraw-Hill. USA.
- 16 PID Control Lab. Internetohjelmisto. REX web farm. <[www.pidlab.com/en](http://www.pidlab.com/en)>. Päivitetty 14.12.2013. Luettu 25.1.2014.
- 17 PID controller. 2014. Verkkodokumentti. Wikipedia. <[http://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller)>. Päivitetty 20.2.2014. Luettu 28.1.2014
- 18 PID Tuning Guide. 2010. Verkkodokumentti. Robert C. Rice, PhD. <<https://gerrie.com/Content/ImageGallery/cs1.pdf>>. Luettu 27.1.2014.
- 19 PID tuning tool. 2014. Ohjelmisto. DotX Control Solutions. <<http://www.dotxcontrol.com/en/downloads/software.html>>. Luettu 25.1.2014.
- 20 PID-säädin. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/PID-s%C3%A4%C3%A4din>>. Päivitetty 10.8.2013. Luettu 27.1.2014.
- 21 Sääntötekniikka 2 (2. opetuskerta). Verkkodokumentti. TKK. <[http://users.tkk.fi/psipari/stadia/k04/St2\\_04t2.pdf](http://users.tkk.fi/psipari/stadia/k04/St2_04t2.pdf)>. Luettu 28.1.2014.
- 22 Scilab. 2014. Ohjelmisto. Scilab Enterprises S.A.S. <<http://www.scilab.org/>>. Päivitetty 18.8.2014. Luettu 25.1.2014.
- 23 Vilkkö Laura. 2008. Diplomityö. Öljynjalostamon vetyverkon epäpuhtauksien vaikutus jalometallikatalyytteihin. TKK.
- 24 Ylivainio, Matti. 2002. Prosessin säätö, PID-säädin, säätöalgoritmeja. Luentomoniste. Vaasan ammattikorkeakoulu.
- 25 Yeffry Hankodo Putra. 2009. Tuning methods of PID controller. <<http://elib.unikom.ac.id/files/disk1/389/jbptunikompp-gdl-yeffryhand-19448-13-bab13.pdf>>. Luettu 22.2.2014.

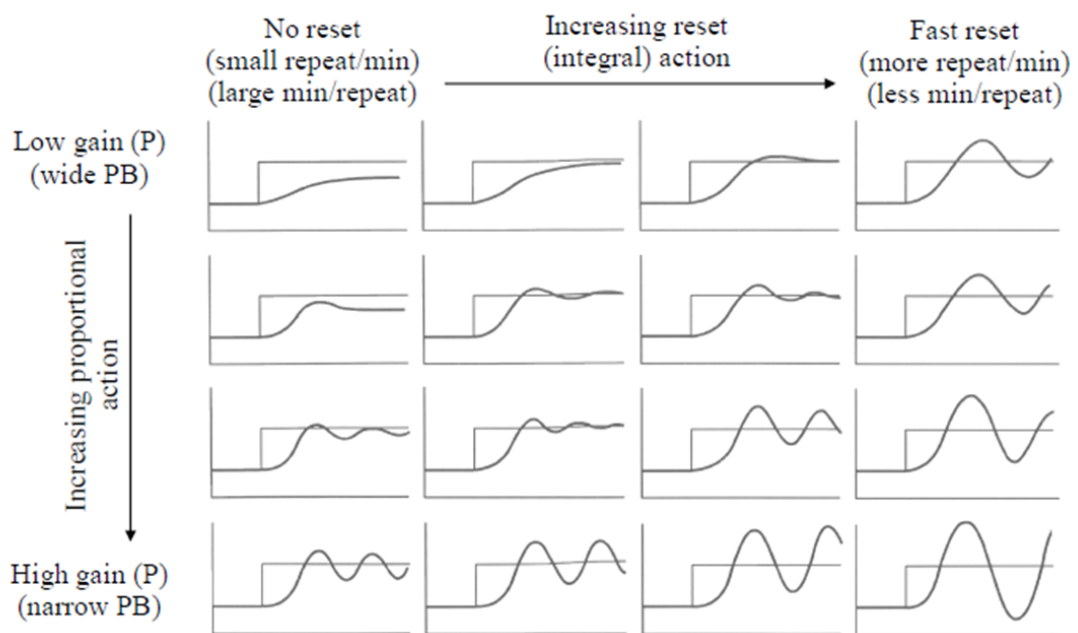


Kuva 6. Jatkuvatoimisen katalyyttien tutkimuslaitteiston virtauskaavio.

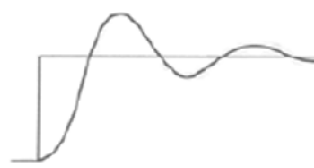
## Manuaalinen viritys

Viritys tehdään online tilassa.

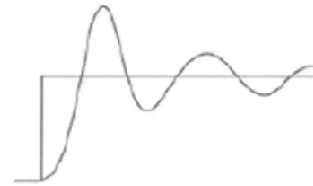
1. Aseta ensin  $K_i$  ja  $K_d$  arvot nolnaan.
2. Lisää  $K_c$  kunnes piirin lähtö alkaa värähtelemään, aseta tällöin  $K_c$  arvo noin puoleen tästä.
3. Seuraavaksi kasvata  $K_i$ :n arvoa kunnes värähtely tasoittuu riittävän ajoissa. Lisättäessä  $K_i$  arvoa liikaa aiheuttaa se epävakautta.
4. Lopuksi kasvata  $K_d$ :n arvoa, tarvittaessa, kunnes piiri tarpeeksi nopeasti saavuttaa asetusarvon kuormitushäiriön jälkeen. Liiallinen  $K_d$ :n lisääminen aiheuttaa voimakkaan vasteen ja yliampumista.



Kuva 7. Virityskuvasto (P, I). [25]



Paras viritys (P, I)



Liian vähän (D)



Lisätty (D)  
vahvistus kasvaa  
integrointi nopeutuu

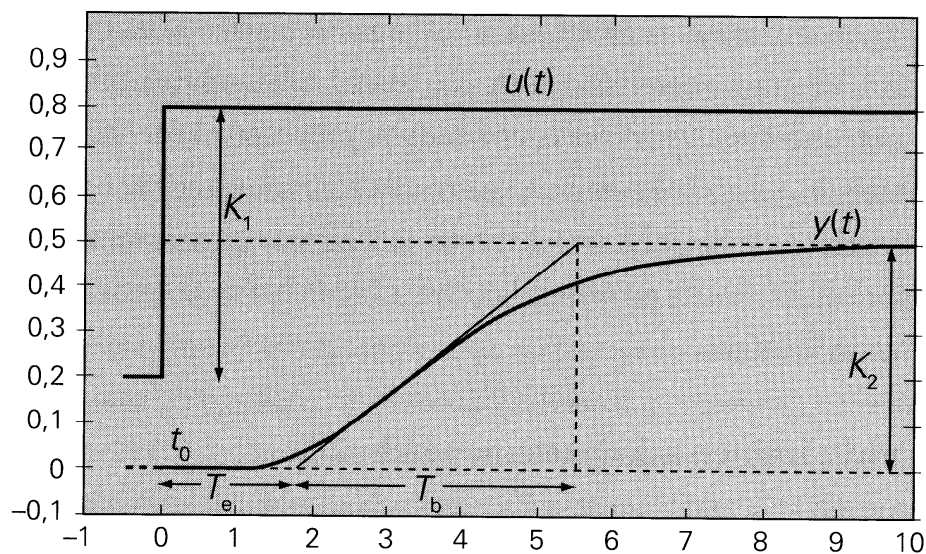


Liian paljon (D)

Kuva 8. Derivointitermin lisäämisen vaikutus (D). [25]

## Askelvastemenetelmä

1. Laita säädin käsiajolle.
2. Varmista, että koetilanteessa järjestelemään ei vaikuta häiriösuureita tai kuormitusvaihteluja.
3. Tee nopea, askelmainen muutos säätimen lähtömuuttujaan.
4. Tallenna askelmainen toimilaitteen ohjaus sekä lähtömuuttujan mittausta niin kauan kunnes vaste on selvästi tasaantunut uuteen toimintapisteeseen.
5. Piirrä vasteen jyrkimpään kohtaan tangentti ja määritä prosessimallin kertoimet (aikavakio, vahvistus ja viive) alla olevan kuvan (kuva 9.) mukaisesti sekä laske taulukosta (taulukko 3.) näiden kertoimien avulla tarvittavat säätöparametrit.
6. Lasketut säätimen vahvistukset ( $K_c$ ) on syytä jakaa kahdella näin parantaen vakautta ja vähentäen ylitystä.



Kuva 9. 1. kertaluvun parametrien määrittäminen. [2]

Lyhenteiden selitykset:

$T_b$  = aikavakio

$T_e$  = viive

$K_2/K_1$  = vahvistus

$K_1$  = askeleen suuruus

$K_2$  = vasteen suuruus

$K_2/T_b$  = kulmakerroin

## Värähtelymenetelmä

Suljetulle säätösystemille normaalissa toimintapisteessä suoritetaan seuraavasti:

1. Aseta derivointiaika nolaksi, aseta integrointiaika äärettömän suureksi, näin ollen säädin on pelkällä suhdesäädöllä.
2. Varmista, että koetilanteessa järjestelemään ei vaikuta häiriösuureita tai kuormitusvaihteluja.
3. Lisää hiljalleen manuaalisesti säätimen vahvistusta, kunnes säätöpiirin värähtely kasvaa. Kun värähtely on jatkuvaa, vakio amplitudilla tapahtuvaa, on saavutettu säätöpiirin stabiilisuusraja. Tätä kutsutaan kriittiseksi vahvistukseksi  $K_{p\text{kriit}}$ .
4. Määritä tämän aikaansaaman jatkuvan värähtelyn jakson pituus  $T_{\text{kriit}}$ .
5. Laske taulukosta (taulukko 4. tai taulukko 5.) jatkuvan värähtelyn menetelmän mukaiset suositukset tarvittaville säätöparametreille.

### Cohen-Coon viritysmenetelmä

1. Odota kunnes prosessi saavuttaa vakaan tilan.
2. Seuraavaksi syötä uusi askelmuutos.
3. Lähdön perusteella saadaan likimääräinen 1. kertaluvun aikavakio  $\tau$  ja  $\tau_{kuollut}$ .
4. Käyttäen hyväksi kokeesta saatuja arvoja,  $t_0$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ , A ja B. Laske prosessin parametrit  $t_1$ ,  $\tau$ ,  $t_d$  ja K.

$$t_1 = \frac{t_2 - \ln(2) \times t_3}{1 - \ln(2)} \quad (9)$$

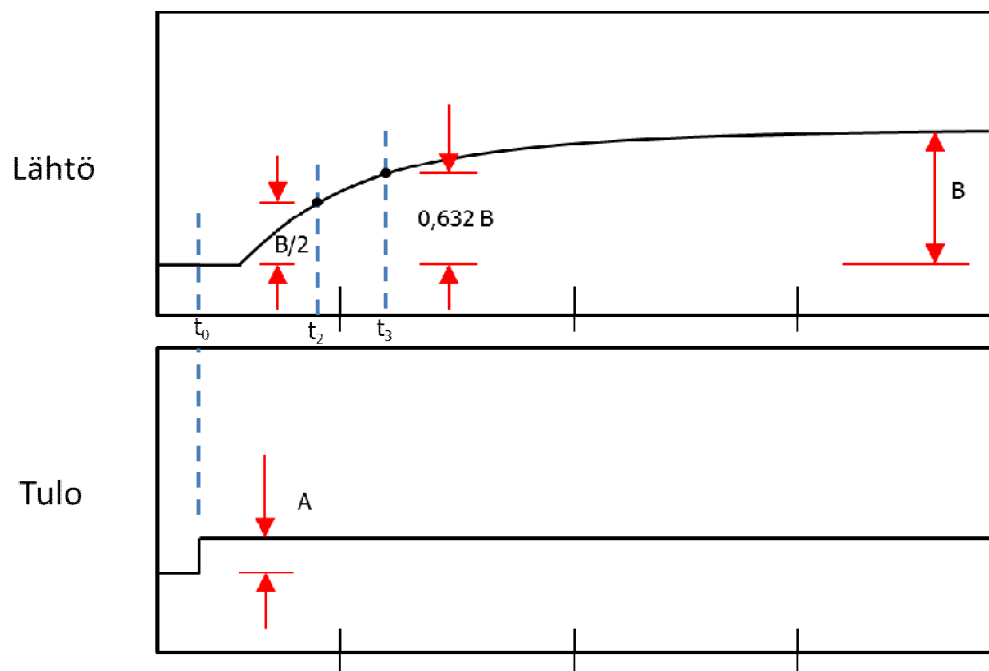
$$\tau = t_3 - t_1 \quad (10)$$

$$t_d = t_1 - t_0 \quad (11)$$

$$K = B/A \quad (12)$$

$$r = \frac{t_d}{\tau} \quad (13)$$

5. Määritä näiden perusteella säätimen parametrit taulukosta (taulukko 6.).



Kuva 10. Parametrin määrittäminen, jossa  $t_0$  on aloitus aika,  $t_2$  on aika, jolloin muutos 50 %,  $t_3$  on aika, jolloin muutos 63,2 %.



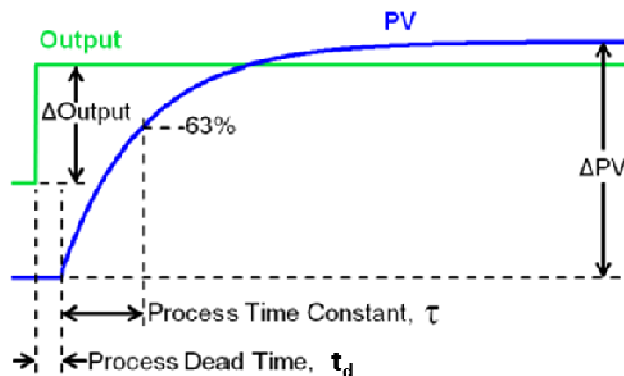
### Lambda viritysmenetelmä (itsesäätyvä avoin piiri)

1. Laita säädin manuaalille ja anna prosessin tasoittua.
2. Tee askelmuutos säätimen lähtöön (Output) ja odota prosessimuuttujan (PV) tasoittumista. Askel muutoksen pitäisi olla tarpeeksi suuri, jotta prosessimuuttuja (PV) siirtyy pois prosessin aiheuttamasta melusta/häiriöstä.
3. Määritä prosessin parametrit:  
Prosessivahvistus ( $K_P$ ).

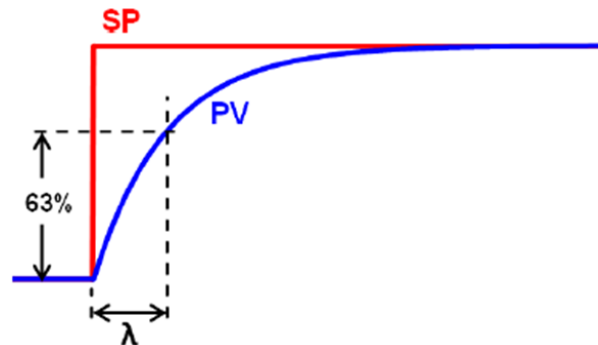
$$K_P = \frac{\Delta PV}{\Delta \text{Output}}$$

(14)

Kuollut aika ( $t_d$ ) ja aikavakio ( $\tau$ ).



Kuva 11. Parametrien määrittäminen



Kuva 12. Lambdan valitseminen

4. Toista kohdat 2 ja 3 esim. kaksi kertaa. Laske näistä keskiarvot. Valitse haluttu lambda ( $\lambda = 2 \dots 3 \times \tau$ ).
5. Laske parametrit säätimelle (yksiköt minuutteina tai sekunteina)

$$K_c = \frac{\tau}{K_P(\lambda + t_d)}$$

(15)

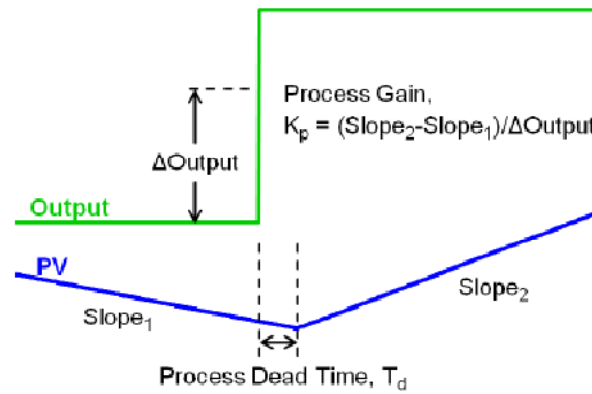
$$T_i = \tau$$

(16)

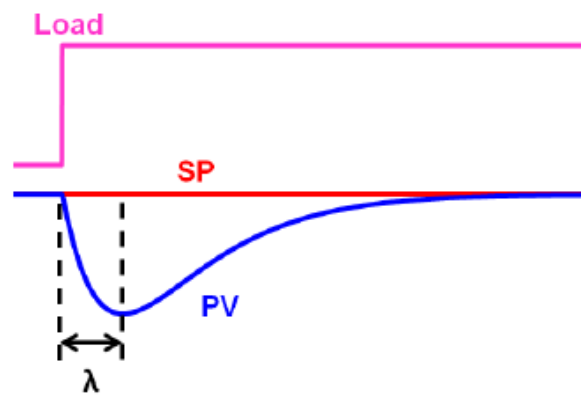
$$T_d = 0$$

(17)

### Lambda viritysmenetelmä (integroiva avoin piiri)



Kuva 13. Parametrien määrittäminen



Kuva 14. Lambdan valitseminen.

### Kuollut aika viritysmenetelmä (Dead time rule)

1. Laita säädin manuaalille ja anna prosessin tasoittua.
2. Tee askelmuutos säätimen lähtöön (Output) ja odota prosessimuuttujan (PV) tasoittumista. Askelmuutoksen pitäisi olla tarpeeksi suuri, jotta prosessimuuttuja (PV) siirtyy pois prosessin aiheuttamasta melusta/häiriöstä.
3. Määritä parametrit:

$$t_d = \text{kuollut aika}$$

$$gp = \frac{dPV[\%]}{dCO[\%]} \quad (18)$$

$$\text{Esimerkki } (54-50)/(45-40.5) = 4/4.5 = 0.89$$

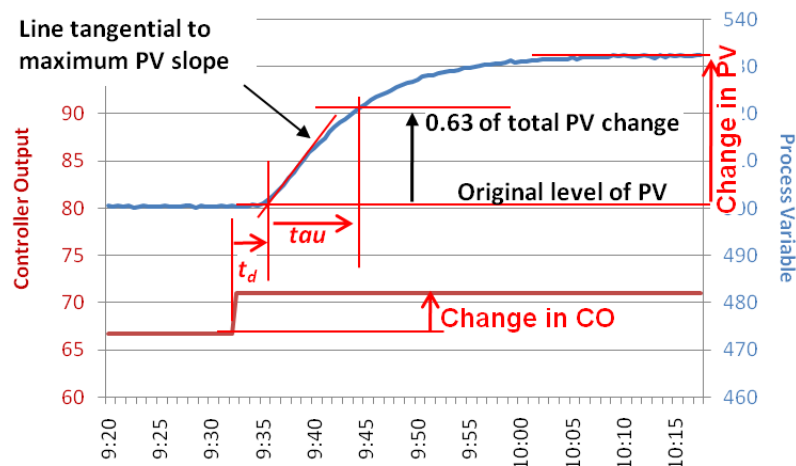
VM on vakaus marginaali, jolle voidaan antaa arvo 1-4 välistä. Arvoa 2,0 tai suurempaa suositellaan käytettävän. Näin vähennetään ylittymistä ja piiristä saadaan vahvempi prosessitilanteiden muutoksille.

4. Laske parametrit:

$$K_c = \frac{0,36}{(gp \times VM)} \quad (19)$$

$$T_i = \frac{t_d}{3} \quad (20)$$

$$T_d = 0 \quad (21)$$



Kuva 15. Parametrien määrittäminen. [4]

## Taso-keskiarvo viritysmenetelmä (Level-averaging) Säiliöiden pinnansäätäminen

1. Varmista tasainen sisä- ja ulosvirtaus säiliölle.
2. Laita säädin manuaalille ja anna prosessin tasoittua.
3. Tee askelmuutos säätimen lähtöön (Output) ja odota prosessimuuttujan (PV) tasoittumista. Askelmuutoksen pitäisi olla tarpeeksi suuri, jotta prosessimuuttuja (PV) siirtyy pois prosessin aiheuttamasta melusta/häiriöstä.
4. Piirrä viivat (slope 1 ja slope 2) kuvan (kuva 16.) mukaan.
5. Määritä prosessin parametrit:

$t_d$  = kuollut aika

$$DS = \frac{(PV4 - PV3)}{T2} - \frac{(PV2 - PV1)}{T1} \quad (22)$$

PV = 0-100 %, muunna prosenttiosuudeksi.

$$DS\% = 100 \times \frac{DS}{(PV \max - PV \min)} \quad (23)$$

$$ri = \frac{DS\%}{dCO} \quad (24)$$

VM on vakaus marginaali, jolle voidaan antaa arvo 1-4 välistä. Arvoa 2,0 tai suurempaa suositellaan käytettävän. Näin vähennetään ylittymistä ja piiristä saadaan vahvempi prosessitilanteiden muutoksille.

6. Laske parametrit:

PI:

$$K_c = \frac{0,9}{(VM \times ri \times t_d)} \quad (24)$$

$$T_i = 3,33 \times VM \times t_d \quad (25)$$

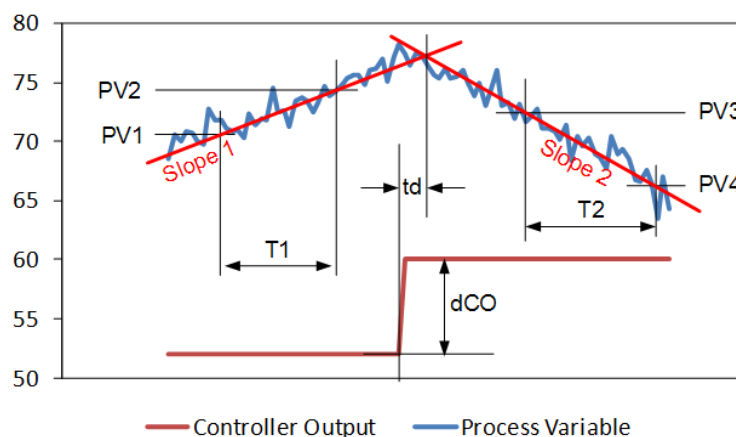
$$T_d = 0 \quad (26)$$

PID:

$$K_c = \frac{1,2}{(VM \times ri \times t_d)} \quad (27)$$

$$T_i = 2 \times VM \times t_d \quad (28)$$

$$T_d = \frac{t_d}{2} \quad (29)$$



Kuva 16. Parametrien määrittäminen. [4]

## Välisäiliöiden pinnansäätäminen

1. Määritä säiliön viipymäaika ( $t_{res}$ ).
  - Tarkoitetaan aikaa, joka kuluu välisäiliön tyhjentymiseen (100 % - 0 %), kun ulostulo venttiili on 100 %:sti auki. ( $t_{res}$  = välisäiliön nestetilavuus (100 % - 0 %) / ulostulo venttiilin maksimi virtausnopeus)
  - Jos tilavuutta ja/tai maksimi virtausnopeutta ei tiedetä, voidaan viipymäaika arvioida, tekemällä askelvastekoe. ( $t_{res} = 1/r_i$ , ks. liite 9.).
2. Määritä suurin odotettu muutos virtausnopeudessa ( $\Delta f_{max}$ ).
  - Esitetään prosenttiosuutena venttiilin maksimi kapasiteetistä.
3. Määritä suurin hyväksyttävä poikkeama ohjearvosta ( $\Delta L_{max}$ ).
  - Esitetään prosenttiosuutena tason mittauksesta.
4. Virittämiseen on olemassa kaksi erilaista vaihtoehtoa. Laskentakaavat ovat vuorovaikutuksiselle tai vuorovaikutuksettomalle algoritmille.

Laske parametrit:

$$K_c = 0,74 \times \frac{\Delta f_{max}}{\Delta L_{max}} \quad (30)$$

$$T_i = 4 \times \frac{t_{res}}{K_c} \quad (31)$$

$$T_d = 0 \quad (32)$$

Nopeampi vaste:

$$K_c = 0,5 \times \frac{\Delta f_{max}}{\Delta L_{max}} \quad (33)$$

$$T_i = 0,74 \times \frac{t_{res}}{K_c} \quad (34)$$

$$T_d = 0 \quad (35)$$

**Kaskadisäätimen viritys**

1. Ohjaa prosessi ensin toimintapisteeseen käsiajolla.
2. Viritä apu/alasäädin ensin esimerkiksi värähtelymenetelmällä, laske parametrit ja aseta saadut parametriarvot.
3. Aseta apu/alasäädin automaattiajolle, käyttäen edellä saatuja parametriarvoja.
4. Viritä pääsäädin esimerkiksi värähtelymenetelmällä, laske parametrit ja aseta saadut parametriarvot. Pääsäädin viritetään noin 3...5 kertaa hitaammaksi kuin alasäädin.
5. Testaa ja hieno viritä pääsäätimen toiminta.

## Piirin suorituskyyky ongelmat



**Kuva 17. Vikojen etsiminen. [4]**

Säätöpiirin huono suorituskyky ei aina johdu pelkästään huonosta vurityksestä. Syynä voi olla esim. vääränlainen venttiili, säätöventtiilin kitka tai prosessin aiheuttama häiriö. Syyn selvittyä tehdään tarvittavat korjaavat toimenpiteet.

1. Heilahtelun syiden selvittäminen: Aseta ohjain manuaalille ja katso jos värähtely loppuu, jos värähtely loppuu syntyvät ne piiristä. Kyseessä voi olla piirin sisäinen tai ulkoinen häiriö.
2. Hitauden syiden selvittäminen: Syynä voi olla laitteiden ongelmat (esim. säätöventtiilin aiheuttama hystereesi) tai huono virtitys.
3. Häiriöiden syiden selvittäminen: Syynä voi olla ohjaus puolen vaikuttava tekijä kuten höyryn virtauksesta aiheutuva lämpötilan heilahtelu tai prosessista johtuva eli kaikki muut prosessihäiriöt, jotka vaikuttavat prosessimuuttujaan.